技術資料

京大加速器中性子源(KUANS)のための リエントラントホールを有する減速材の設計

沖田 将一朗^{1,*}, 田崎 誠司², 安部 豊²

Neutronic Design of Neutron Moderator on a Reentrant-hole Configuration for Kyoto University Accelerator-based Neutron Source (KUANS)

Shoichiro OKITA^{1,*}, Seiji TASAKI² and Yutaka ABE²

¹Sector of Fast Reactor and Advanced Reactor Research and Development, Japan Atomic Energy Agency, 4002 Narita-cho, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki 311-1393, Japan

²Department of Nuclear Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyotodaigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan

(Received March 12, 2020; accepted in revised form April 8, 2020; published online July 21, 2020)

The Kyoto University Accelerator-based Neutron Source (KUANS) is a compact neutron source that is mainly used for spectrometer and detector development. In addition, it is also suited for experiments to study the neutronic design of moderators owing to the relatively low neutron generation yield by ${}^9\text{Be}(p,n)$. We present a neutronic design of the neutron moderator on a reentrant-hole configuration for KUANS to enhance the neutron emission, and some experiments are conducted at KUANS for verification. A polyethylene moderator on a reentrant-hole configuration is designed by PHITS calculation and is introduced to KUANS to obtain intense oblong neutron beams. The intensity of the pulsed neutron beam is experimentally measured. The results reveal that the intensity becomes approximately 1.9 times stronger than that of the conventional rectangular design. In addition, the ratio of its intensity to the conventional intensity increases to approximately threefold as the neutron wavelength increases. It is interesting to note that the longer the neutron wavelength, the more efficiently they are extracted from the inside of the moderator owing to the existence of the reentrant-hole configuration.

KEYWORDS: neutron source, thermal neutron, time-of-flight method, PHITS, design, neutron moderator, reentrant hole, KUANS

I. 緒 言

低速中性子は、対象とする原子の位置や運動の情報を得るためのユニークなプローブであり、物質科学、核物理、生命科学等の多岐に渡る学術分野で広く利用されている。特に日本の J-PARC MLF や米国の SNS 等の MW 級の大陽子ビーム加速器から発生する大強度の低速中性子ビームを用いた学術利用が盛んである^{1~3)}。近年では低速中性子ビームの利用は学術分野のみならず産業分野にも広がっている。その利用者および利用方法の拡大も進んでお

り³⁾、例えば、製品評価や中性子デバイスの開発等を目的とし、少ない統計量でもよいので頻繁に利用したいといったニーズが高まっている。しかし、既存の大型加速器中性子源だけで低速中性子ビームの利用のすべてのニーズを満たすことは、ビームタイムの確保の観点から現実的ではない^{3~6)}。そのため、今日では、ビームタイムや測定体系に関して利用者の要望に柔軟に対応することができる小型加速器中性子源の有用性が認識され、金属材料におけるナノ構造の予備解析や中性子検出器・分光器の開発等を目的とした利用が拡大している^{7~10)}。

京大加速器中性子源(KUANS)は、京都大学理学部に設置された小型加速器中性子源である。その中性子発生強度は約 10^{11} n/s であり^{5,10)}、放射化物の発生量が極めて少な

¹ (国研)日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門

² 京都大学大学院 工学研究科原子核工学専攻

* Corresponding author, E-mail: okita.shoichiro@jaea.go.jp

く、大型加速器中性子源であれば近づくことすら困難な中性子源近傍に人が立ち入って作業することが可能である。さらに、遮蔽が少なく済むため、施設に備え付けられているクレーンを使って、比較的容易に遮蔽体を動かすこともできる。そのため KUANS では、減速材を容易に交換できるとともに、特別な収納容器等を必要としない常温(300 K 程度)のポリエチレン(PE)が減速材として用いられていることから、その形状を変更することも容易である。

一般的に大型加速器中性子源のみならず小型加速器中性子源においても、低速中性子のビーム強度が大きい方が、中性子の検出イベント率が多くなるため、測定精度の向上や同等な統計精度を得るための測定時間の短縮が望める。しかし、小型加速器中性子源の高度化を図る上で、中性子発生強度を増加させるのは、加速器の大型化やターゲットの放射化量の増加等を伴うため、施設管理上の観点から必ずしも望ましいとはいえない。そこで、ターゲットでの中性子発生強度はそのままに、得られる低速中性子ビームの強度を増加させることが重要であり、そのための方法の1つとして、利用目的に特化した減速材の設計を行うことが挙げられ、減速材へのアクセス性の高い KUANS の高度化を図る上では、特に有用である。

本報では、ターゲットでの中性子発生強度はそのままに、得られる低速中性子ビームの強度を増加させることを目的とし、KUANS を対象としたリエントラントホールを有する PE 減速材の設計を提示する。さらに、中性子飛行時間(TOF)法によるスペクトル測定実験を行い、提示した減速材の設計の妥当性をあわせて確認する。

II. 京大加速器中性子源(KUANS)

KUANS は、商業的に利用可能な陽子線ライナック

(AccSys Technology, Inc. 製)、Be ターゲット、PE 減速材、黒鉛反射体、コンクリート遮蔽体等からなり、主に検出器・分光器の開発や教育を目的とした低速中性子ビーム実験等に用いられている。中性子発生強度は約 10^{11} n/s であり、日本国内の代表的な小型加速器中性子源である理研加速器中性子源(RANS)と比べて1桁程度小さい¹¹⁾。**Fig. 1** の左側は KUANS の概略図である。ターゲットの水素脆化を考慮して、厚さ $50\ \mu\text{m}$ の Be の薄膜が、水素の拡散係数が比較的大きい Nb の板に銀ろう付けされている^{10,12)}。Nb には、中性子の照射によって発生する放射化物の半減期が長いというデメリットがあるが、KUANS のような中性子発生強度の小さい施設では、放射化量が比較的少ないため利用可能である^{11,12)}。陽子ビームによって発生する熱は、Nb の板の後ろを流れる冷却水によって取り除かれる。減速材は、Fig. 1 の右側のような直方体形状($12\times 12\times 8.5\ \text{cm}^3$)の常温の PE であり、その周りには黒鉛の反射体で覆われている。減速された中性子は、陽子ビームの入射方向に対して 90° 方向に取り出される。

KUANS の運転条件は、陽子のエネルギー 3.5 MeV、平均電流 $50\ \mu\text{A}$ 、ピーク電流 10 mA、パルス幅 $60\ \mu\text{s}$ 、繰り返し周期 100 Hz である。パルス中性子源であるため TOF 法を用いて時間弁別することで、実験に利用する低速中性子に起因する計数上のシグナルはそのままに、高速中性子に起因する計数上のノイズを下げるができるため、両者の比である S/N 比を高めることが可能となる。

III. 設計方法および設計の妥当性の確認方法

1. 設計の方針

$^9\text{Be}(p,n)$ 反応により発生した波長の短い高速中性子が PE 減速材内で十分に減速され、減速材の外側の中性子ビームライン上へと取り出されることで、低速中性子ビー

Fig. 1 Schematic view around the moderator of KUANS (left) and the dimension of the conventional rectangular-shaped moderator(right)

ムを利用することができる。一般的に中性子の波長が長い程，減速材内の水素による吸収が大きくなるため，低速中性子が水素に吸収される前に中性子ビームライン上に取り出す工夫が重要となる。

PE の減速材表面にリエントラントホールを設けることにより，減速材内から取り出される中性子のビーム強度が増加することがわかっている^{13~16)}ので，それをもとに KUANS を用いたビーム実験に適したリエントラントホールを有する PE 減速材を提案した。低速中性子の PE 中の拡散距離は数 cm 程度であるため，低速中性子ビームの取り出し面に cm 単位の寸法の PE 減速材にリエントラントホールを設けることにより，減速材内での吸収の影響を低減しつつ，低速中性子を効率よく取り出すことができ，一方で高速中性子は，拡散距離が長く，cm 単位の PE 減速材の形状の違いによる影響をほとんど受けないと予想される。そのため，リエントラントホールを設けることで，ビーム実験に利用する低速中性子のビーム強度が増加する一方でノイズとなり得る高速中性子のビーム強度は増加しないと考えられ，S/N 比の向上が期待できる。さらに，この方法であれば，加速器の仕様変更等の大がかりな改造を伴わないため，低コストかつ短期間で低速中性子のビーム強度の増加を実現できる。

本設計では，KUANS における検出器や分光器のテスト利用等の用途^{10,17)}を想定し，縦長にコリメートされたビームの強度を高めるため，リエントラントホールの形状は縦長とした。

2. 設計の方法

最初に，リエントラントホールを設ける位置を決定した。cm 単位の寸法のリエントラントホールの影響を受け得る熱外中性子から冷中性子までの幅広い波長の中性子 (0.5–4.5 Å) に対して，直方体形状の PE 減速材内部の強度分布を計算した。リエントラントホールを設ける位置はこの中性子強度の計算値が最大となる箇所とした。

次に，リエントラントホールの寸法を決定した。リエントラントホールの横幅は，KUANS における検出器や分光器のテスト利用等でよく用いられるスリット幅と同程度の 1 cm とする。リエントラントホールの深さ (中性子ビーム方向) については 3 cm, 4 cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm の 5 パターンを考え，各深さに対して，リエントラントホールの縦幅を 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm と 2 cm 刻みに条件を変えてパラメータサーベイを実施する。リエントラントホールの寸法は，リエントラントホールの開口部において 0.5–4.5 Å の低速中性子強度の計算値が最大となる寸法とした。

計算に用いた計算コードは，粒子・重粒子輸送計算コード PHITS2.98¹⁸⁾であり，使用する核データは JENDL-4.0¹⁹⁾である。計算条件を Table 1 にまとめる。3.7 MeV の陽子ビームと Be の核反応によって生じる中性子のエネ

Table 1 Simulation Conditions for KUANS

Source	
Projectile	Neutron
Energy spectrum	Experimental data of $^9\text{Be}(p, n)^{20)}$
Source region	Point source
Target	
Material	Nb 8.57 g/cc (300 K) H ₂ O 1.00 g/cc (300 K) Al 2.70 g/cc (300 K)
Size	10 cm ϕ , 0.5 cmt
Moderator	
Material	PE 0.97 g/cc (300 K)
Size	12 × 12 × 8.5 cm ³
Reflector	
Material	Graphite 1.85 g/cc (300 K)
Size	40 × 35 × 30 cm ³

ルギー・角度分布の測定値²⁰⁾を中性子発生源の情報として与え，ターゲットは Nb, H₂O (ターゲット冷却水)，Al の 3 層からなる厚さ各 0.5 cm，直径 10 cm の円柱でモデル化した。

3. TOF 法によるスペクトル測定実験の方法

KUANS はパルス中性子源であるため，一度の測定で広域の波長ごとの中性子の計数が得られる点で優れる TOF 法を用いてスペクトル測定を行うことが可能である。そこで，新たに提示するリエントラントホールを有する PE 減速材と直方体形状の PE 減速材の 2 種類について，TOF 法によるスペクトル測定を行った。Fig. 2 には，TOF 法によるスペクトル測定実験の体系を示す。リエントラントホールを正面に見込むように減速材の表面に B₄C 焼結体のスリットとホウ酸入り PE ブロックのコリメータを配置し，これによりノイズの低減を図った。さらに， ^3He 検出器の手前の位置 (減速材表面から 178 cm) に 2 つ目のスリットを配置し，発散中性子を除いている。

0.5–4.5 Å の低速中性子の計数率の積分値を評価した。ここで，リエントラントホールを有する PE 減速材から得られる中性子計数率の積分値を I_1 ，直方体形状の PE 減速材から得られる中性子計数率の積分値を I_2 としたとき，計数比 I_1/I_2 の値は，直方体形状の PE 減速材から得られる低速中性子のビーム強度に対するリエントラントホールを有する PE 減速材から得られる低速中性子のビーム強度比を表し，測定体系の幾何条件や検出器の検出効率に依存しない値となる。提示する設計の妥当性はこの計数比 I_1/I_2 の値と計算から得られる低速中性子のビームの強度比の間で比較することで確認した。

Fig. 2 Experimental geometry of beam intensity measurement

Fig. 3 Slow neutron distribution of the inside of the polyethylene moderator

IV. 結 果

1. 設計の結果

Figure 3 に減速材内部の $0.5\text{--}4.5\text{ \AA}$ の低速中性子の強度分布を示す。低速中性子は、図中の矢印 (Neutron beam) の方向に取り出される。ターゲットに接する側の減速材の端から 2 cm 付近の位置で $0.5\text{--}4.5\text{ \AA}$ の低速中性子強度の計算値が最大となる。したがって、Fig. 3 の黒枠の位置にリエントラントホールを設けることにした。

Figure 4 にリエントラントホールの寸法に関するパラメータサーベイの結果を示す。図中の5つの曲線は、リエントラントホールの深さに対応しており、 3 cm 、 4 cm 、 5 cm 、 6 cm 、 7 cm の5パターンを考えている。横軸は各リエントラントホールに対する縦幅の大きさを表

Fig. 4 Calculation results of the ratio of the slow neutron intensity of the reentrant-hole moderator to the conventional rectangular-shaped moderator

し、縦軸は直方体形状のPE減速材とリエントラントホール付きPE減速材から得られる低速中性子(0.5-4.5 Å)の強度比の計算値を表している。ターゲットに接する側の減速材の端から2 cmの位置に寸法が横幅1 cm、縦幅6 cm、深さ6 cmのリエントラントホールを設けたとき、減速材の表面において、0.5-4.5 Åの中性子強度の計算値が最大となり、その強度は直方体形状の減速材から得られる0.5-4.5 Åの低速中性子強度の1.9倍である。したがって、リエントラントホールの寸法は、横幅1 cm、縦幅6 cm、深さ6 cmとした。直方体形状のPE減速材(左側)と今回設計したリエントラントホールを有する減速材(右側)の写真をFig. 5に示す。写真手前側の面が低速中性子のビームの取り出し面となる。

2. TOF 法によるスペクトル測定実験の結果

Figuer 6 は TOF 法によって得られた各形状の減速材

に対する波長ごとの中性子ビームの計数率[1/h]を表したものである。波長が0.5 Å以下の計数率の大きな領域は減速が不十分な高速中性子を表しており、波長が0.5 Å以上の領域では明瞭なMaxwell分布がみとれ、中性子が十分減速されていることがわかる。波長が4.5 Å以上の領域では、計数率が0に近いため、低速中性子ビームの計数率として、波長が0.5-4.5 Åの範囲の領域における計数率の積分値を考えればよいことがわかる。Fig. 6の低速中性子ビームの計数率は、リエントラントホールを有する減速材では、直方体形状の減速材の1.9倍の強度であった。一方で、PHITSによる計算では、波長が0.5-4.5 Åの中性子に対して、リエントラントホールの開口部分において、直方体形状のPE減速材から得られる中性子ビームの1.9倍のビーム強度が得られると計算された。実験値と計算値は一致しており、設計の妥当性が実験的に確認された。

また、Fig. 7は、直方体形状のPE減速材から得られ

Fig. 5 Photographs of the conventional rectangular-shaped moderator (left) and the reentrant-hole moderator (right) of KUANS

Fig. 6 Experimental result of the TOF spectrum of the reentrant-hole moderator to the conventional rectangular-shaped moderator

Fig. 7 Experimental result of the count ratio of the reentrant-hole moderator to the conventional rectangular-shaped moderator

る中性子ビームに対するリエントラントホール付き PE 減速材から得られる中性子ビームの波長ごとの計数比を表している。波長が $0.5 \text{ \AA}$ 以下の高速中性子については、中性子ビームの計数比は約 1 であり、リエントラントホールの影響をほとんど受けない一方で、低速中性子では、波長の増加に伴い計数比が増加し、波長が $3 \text{ \AA}$ 以上の領域で最大 3 倍程度まで増加した。このようにリエントラントホールを設けた場合では、直方体形状と比較して、波長の長い中性子ほど強度比が増加し、S/N 比の向上の観点から好ましい特性が確認された。

V. 結 論

KUANS の低速中性子ビーム強度を増加させるためのリエントラントホールを有する減速材の設計を実施し、設計の妥当性の確認のため TOF 法によるスペクトル測定実験もあわせて行った。

KUANS の常温の PE 減速材において低速中性子強度の計算値が最大となるリエントラントホールの位置と寸法を求めたところ、位置はターゲットから 2 cm 離れたところであり、寸法は横幅 1 cm 、縦幅 6 cm 、深さ 6 cm であった。

上記の設計を KUANS の PE 減速材に適用し、設計の妥当性の確認のため TOF 法によるスペクトル測定を行い、以下の結果を得た。

- 波長が $0.5 \text{ \AA}$ 以上の低速中性子ビームの強度は 1.9 倍増加した。
- 波長の長い中性子ほど波長ごとのビーム強度比は増加し、最大で 3 倍程度になった。

実験で得られた波長が $0.5 \text{ \AA}$ 以上の低速中性子のビームの強度は、計算値と一致しており、設計の妥当性が確認された。さらに、リエントラントホールを設けることにより、ビーム実験においてノイズとなり得る高速中性子のビーム強度は増加しない一方で、実験に利用する低速中性子のビームの強度は増加するという S/N 比の向上の観点から好ましい特性が確認された。

中性子ビーム実験を実施するに当たり、陽子線加速器の管理・運転の面で多大なるご協力をして頂きました京都大学大学院 理学研究科の廣瀬昌憲技官、また、有益な助言・コメントをして頂いた京都大学複合原子力科学研究所の日野正裕准教授と小田達郎助教に深く感謝申し上げます。さらに日本原子力研究開発機構 高速炉・新型炉研究開発部門の後藤実グループリーダーには、本報告をまとめるに当たり多くのご助言を頂きました。ここに明記し、謝意を表します。

一 参考文献

1) Y. Ikeda, "J-PARC status update," *Nucl. Instrum. Method Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors*

Associated Equipment, **600.1**, 1-4 (2009).

2) T. A. Gabriel, J. R. Haines, T. J. McManamy *et al.*, "Overview of the Spallation Neutron Source (SNS) with emphasis on target systems," *J. Nucl. Mater.*, **318**, 1-13 (2003).

3) K. Hirota, "On the collaboration between PASJ and JSNS for the construction of compact and medium-sized accelerator driven neutron sources," *Kasokuki*, **15.2**, 69-72 (2018), [in Japanese].

4) K. Hirota, "Development of compact proton accelerator driven neutron sources," *Hamon*, **23.4**, 278-281 (2013), [in Japanese].

5) K. Hirota, "Compact accelerator-driven neutron source," *Hamon*, **28.1**, 29-32 (2018), [in Japanese].

6) Y. Kiyonagi, "JCANS network of compact neutron facilities in Japan," *Eur. Phys. J. Plus*, **131.5**, 132 (2016).

7) Y. Ikeda, A. Taketani, M. Takamura *et al.*, "Prospect for application of compact accelerator-based neutron source to neutron engineering diffraction," *Nucl. Instrum. Method Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment*, **833**, 61-67 (2016).

8) Y. Ikeda, M. Takamura, T. Hakoyam *et al.*, "Development of on-site measurement technique of retained austenite volume fraction by compact neutron source RANS," *Tetsu to Hagane-J. the Iron Steel Inst. Jpn*, **104.3**, 138-144 (2018), [in Japanese].

9) S. Satoh, "Development of an FRP system which is a two-dimensional position-sensitive neutron detector," *Hamon*, **27.1**, 8-11 (2017), [in Japanese].

10) S. Tasaki, T. Nagae, M. Hirose *et al.*, "Properties and possible applications of Kyoto University Accelerator Based Neutron Source (KUANS)," *Phys. Procedia*, **60**, 181-185 (2014).

11) I. S. Anderson, C. Andreani, J. M. Carpenter *et al.*, "Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources," *Phys. Rep.*, **564**, 1-58 (2016).

12) Y. Yamagata, K. Hirota, J. Ju *et al.*, "Development of a neutron generating target for compact neutron sources using low energy proton beams," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **305.3**, 787-794 (2015).

13) D. J. Picton, S. M. Bennington, T. A. Broome *et al.*, "Design options for coupled cold moderators on a low power spallation source," *Nucl. Instrum. Method Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment*, **545.1-2**, 363-374 (2005).

14) T. Mitsuyasu, N. Morishima, Y. Nagaya, "Cold neutron production in solid and liquid CH₄ moderators. II: on the reentrant-hole configuration," *Nucl. Instrum. Method Phys. Res. Sect. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors Associated Equipment*, **537.3**, 610-613 (2005).

15) Y. Kiyonagi, "Optimization of grooved thermal moderator for pulsed neutron source, and its characteristics," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **21.10**, 735-743 (1984).

16) N. Watanabe, "Neutronics of pulsed spallation neutron sources," *Rep. Prog. Phys.*, **66.3**, 339 (2003).

17) Y. Kawabata, M. Hino, S. Tasaki *et al.*, "Improvement of the cold neutron beam line (CN-3) in KUR for neutron optical device development," *Physica B: Condensed Matter*, **311.1-2**, 106-111 (2002).

18) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto *et al.*, "Features of par-

- ticle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02.,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55.6**, 684-690 (2018).
- 19) K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa *et al.*, “JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48.1**, 1-30 (2011).
- 20) W. B. Howard, S. M. Grimes, T. N. Massey *et al.*, “Measurement of the thick-target ^9Be (p, n) neutron energy spectra,” *Nucl. Sci. Eng.*, **138.2**, 145-160 (2001).
-